Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 4. 2024. (95-106)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

The Effect of Adding Tungsten Disulfide Nanosheets on the Microstructure and Wear Properties of Al-8Si-3Cu-2Zn Alloy Produced by Powder Metallurgy Method*

Research Article

Mohammad Alipour[a 1]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85890.1134

1- Introduction

The production of nanocomposite using the conventional method of powder metallurgy has weak points, such as not very strong connection lines between the reinforcing phase and the background phase, as well as the non-uniform distribution of nanoparticles in the metal background. The hot-pressing method, which is considered as one of the advanced powder metallurgy methods, overcomes these disadvantages and enables the uniform distribution of nanoparticles in the ground phase. In this method, the powders are first poured into a hardened metal mold and placed in a hot press machine. Next, the powders are gradually pressed into the mold until the specified sintering temperature is reached, under a certain pressure. Therefore, in this research, a hot-pressing method has been used to produce nanocomposite. Although many researchers produced different aluminum-based nanocomposites and investigated their physical and mechanical properties, it is for the first time that the production of Al-8Si-3Cu-2Zn-WS2 nanocomposite is reported. The aim of the current research is to produce nanocomposite based on Al-8Si-3Cu-2Zn alloy reinforced with tungsten disulfide nanoplates (0, 2, and 5 wt. %). Al-8Si-3Cu-2Zn alloy is chosen as the base material due to its hardness and good wear properties. Al-8Si-3Cu-2Zn-WS2 nanocomposites were produced by a combination of powder metallurgy and hot pressing under a temperature of 510 °C. Al-8Si-3Cu-2Zn with and without tungsten disulfide nanoplates will be subjected to wear tests to evaluate the wear resistance.

2- Experimental

Al-8Si-3Cu-2Zn alloy with the chemical composition specified in Table 1 with dimensions of 40 µm and purity of 99% was used as the background phase and tungsten disulfide with dimensions of 90 nm and purity of 99% was used as the reinforcing phase. Pure aluminum, silicon, copper and zinc powders were mixed in a mechanical grinding machine for 40 hours to make an alloy powder sample. The production process of nanocomposite was as follows: first, aluminum alloy powder was milled for 10 hours along with 2 and 5 percentages of tungsten disulfide in a planetary mill machine with two tanks, each of which had a capacity of 30 grams. 1.5% of stearic acid is added to the powders to prevent cold boiling. The ratio of pellets to powder is 10:1 and the grinding speed is 250 rpm. Then the milled powders were poured into a steel mold hardened with spica steel and placed in a special hot press machine for 30 minutes to reach a temperature of 510 °C in an argon environment. In order to evaluate the microstructure of the samples, standard metallographic method ASTM E3-01 was used. The samples were polished to make the sample surface smooth and then etched by a solution containing 82 mL H_2O, 15.5 mL HNO_3, and 0.5 mL HF. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used to study the microstructure of the samples. In addition, grain size measurements were performed using image analysis. Vickers microhardness of the samples was measured using Buehler equipment by applying a load of 200 grams for 15 seconds. Abrasion properties of cylindrical samples after hot pressing were investigated by pin on disc method according to ASTM G99 standard. In order to calculate the weight loss of the samples, the weight of the pin and disk was measured accurately by a sensitive electronic balance before and after the test. At the end of the test, the worn surfaces were examined by an electron microscope.

3- Results and Discussion

The initial size of the aluminum alloy powder particles before the grinding operation was found to be 50 micrometers. After 10 hours of grinding operation, the size of alloy powder particles decreased to 40 micrometers. It is obvious that reducing the particle size leads to less density and more suitable dissolution in the hot-pressing process. The morphology of nanocomposite powders after 10 hours of grinding is shown in Fig 1 a and b. As it is clear in Figure 1, after grinding, the morphology of alloy powders becomes layered and scaly due to severe plastic deformation. Table 1 shows the average value of

* Manuscript received: December 14, 2023, Revised, January 24, 2024, Accepted August 18, 2024.

[1] Corresponding author: Assistant professor, Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran **E-mail:** alipourmo@tabrizu.ac.ir

microhardness of samples produced by hot pressing method. As it is clear after adding nanoparticles up to 5 wt. % to the base, the microhardness value almost doubled. The microhardness value for the alloy base is 50 Vickers which increased to 101 Vickers for the nanocomposite of Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2. Table 2 shows the wear rate obtained from the wear test. The wear rate was calculated according to the density of the sample, the distance and the weight loss of the pin during the wear test. According to the graph, the wear rate has decreased significantly from 74 mm^3/Km for the Al-8Si-3Cu-2Zn alloy base to 51 mm^3/Km for the Al-8Si-3Cu-2Zn -2%WS2 nanocomposite. This reduction in the wear rate can be due to the presence of the reinforcing phase and the creation of a mechanical mixed layer (a layer containing different oxides) that plays the role of a lubricant.

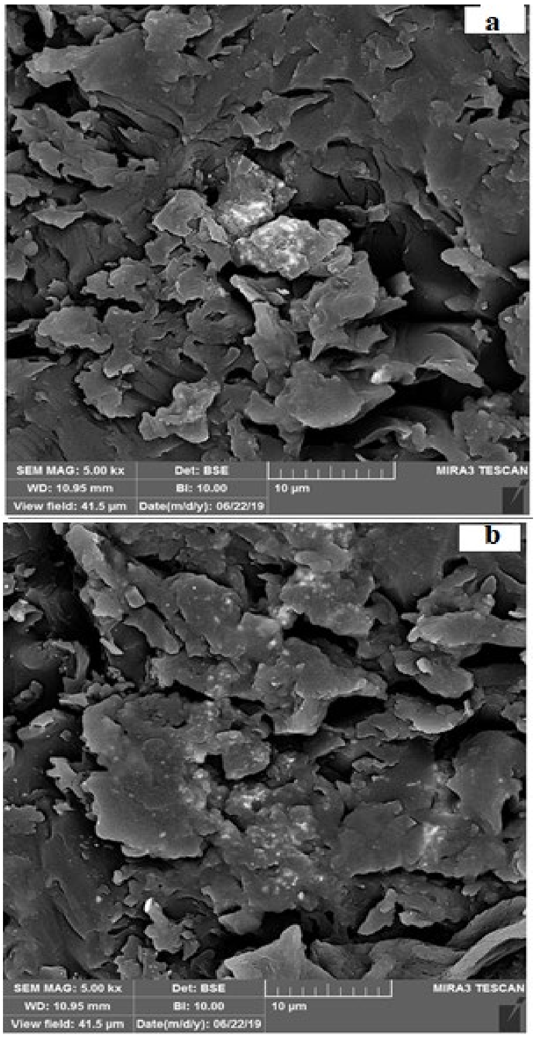


Figure 1- a) aluminum powder containing 2 wt. % of WS2 nanoplates, b) aluminum powder containing 5wt. % of WS2 nanoplates.

Table 1 Hardness results of nanocomposite samples in different conditions

Microhardness samples – Vickers	Welded sample
50	Base sample
72	2 percent WS2
101	5 percent WS2

Table 2 Wear rate results of nanocomposite samples in different conditions

mm^3/Km – Wear rate of samples	Welded sample
74	Base sample
51	2 percent WS2
59	5 percent WS2

4- Conclusions

The following results can be extracted from this study:

In this research, metal matrix nanocomposite with Al-8Si-3Cu-2Zn matrix with reinforcing phase of tungsten disulfide nanoplates with different weight percentages (2.0 and 5 wt. %) were produced. The changes in the morphology and microstructure of the powders after grinding were discussed. The uniform distribution of nanoparticles in the matrix reduced the size of the particles, increased the density and improved the performance of the hot-pressing process. The experimental findings are summarized as follows:

1- The optimal amount of tungsten disulfide nanosheets is 2 wt. %.

2- The accumulation of tungsten disulfide nanosheets at the grain boundary causes brittleness, porosity, less surface bonding and as a result, a decrease in mechanical properties.

3- However, an excessive increase in the amount of tungsten disulfide nanoplates causes accumulation and agglomeration, so the COF and wear rate increase.

4- The wear resistance of the produced nanocomposites is higher than the base sample and the weight loss of the base sample is higher than the optimal sample. Due to the self-lubricating nature of tungsten disulfide nanoplates, the friction coefficient for the base sample and nanocomposite containing 2 wt. % of tungsten disulfide nanoplates is 0.712 and 0.532, respectively, which indicates a reduction in the friction coefficient. Also, the hardness of the samples increases from 50 Vickers for the base sample to 101 Vickers for the sample containing 5 wt. % of tungsten disulfide nanosheets.

5- There was a transition of the wear mechanism from the combination of layered wear, sticky wear, and abrasive wear to mild abrasive wear with the increase of the reinforcing content of graphene nanosheets up to 2 wt. %.

6- Increasing the content of tungsten disulfide nanosheets was beneficial for the formation of MML during the dry sliding process, which can not only protect the worn surface but also reduce the COF of the nanocomposites.

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

تأثیر افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن بر روی ریزساختار و خواص سایشی آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn تولید شده به روش متالورژی پودر*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[۱]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85890.1134

چکیده *در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی (میکروسختی و سایش) نانوکامپوزیت‌های با زمینه Al-8Si-3Cu-2Zn به همراه درصدهای وزنی ۰، ۲ و۵ درصد وزنی از نانوصفحات دی سولفید تنگستن پرداخته شده است. نانوکامپوزیت مورد بررسی از طریق روش آسیای مکانیکی و پرس گرم تحت دمای ۵۱۰ درجه سانتی گراد تولید شده است. ریزساختارهای پودرها قبل و بعد از آسیای مکانیکی و نمونه‌های تف‌جوشی شده از طریق میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی سطوح ساییده شده پس از تست سایش توسط میکروسکوپ الکترونی علت کاهش وزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن تا ۵ درصد وزنی، میکروسختی نمونه‌ها بیش از دو برابر افزایش پیدا می‌کند و از ۵۰ ویکرز برای Al-8Si-3Cu-2Zn به ۱۰۱ ویکرز برای نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn -5%WS2 می‌رسد. با توجه به نتایج تست‌های سایش نرخ سایش برای Al-8Si-3Cu-2Zn -5%WS2 به ترتیب به مقدار ۳۲ درصد نسبت به زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn کاهش پیدا کند. بنابراین از نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn -5%WS2 می‌توان به عنوان یک نانوکامپوزیت خود روانکار با خواص سایشی مطلوب استفاده کرد.*

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی، خواص مکانیکی، نرخ سایش، پرس گرم.

The Effect of Adding Tungsten Disulfide Nanosheets on the Microstructure and Wear Properties of Al-8Si-3Cu-2Zn Alloy Produced by Powder Metallurgy Method

Mohammad Alipour

Abstract *In this research, the mechanical properties (microhardness and wear) of Al-8Si-3Cu-2Zn nanocomposites with 0, 2, and 5% by weight of tungsten disulfide nanoplates have been investigated. The studied nanocomposite was produced through mechanical grinding and hot pressing at a temperature of 510 degrees Celsius. The microstructures of powders before and after mechanical grinding and sintered samples were studied through electron microscopy (SEM). By examining the worn surfaces after the wear test by electron microscope, the cause of weight loss was investigated. The results show that by adding tungsten disulfide nanoplates up to 5% by weight, the microhardness of the samples increases more than twice and from 50 Vickers for Al-8Si-3Cu-2Zn to 101 Vickers for Al-8Si.-3Cu-2Zn nanocomposite reaches -5%WS2. According to the results of the wear tests, the wear rate for Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2 will decrease by 32% %, compared to the Al-8Si-3Cu-2Zn alloy background. Therefore, Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2 nanocomposite can be used as a self-lubricating nanocomposite with favorable wear properties.*

Keywords Aluminum-based nanocomposite, Mechanical properties, Wear rate, Hot pressing.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۲۵ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در دو دهه گذشته توجه زیادی به استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی با توجه به کاربردهای گسترده آن‌ها در صنایع مختلف شده است [1-3]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به عنوان تقویت کننده جهت تولید نانوکامپوزیت می‌تواند به طور قابل توجهی خصوصیات ماده زمینه را بهبود ببخشد [4-8]. در سال‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با توجه به خواص بی‌نظیرشان از جمله چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، کاربرد روزافزونی در صنایع نظامی، هوا و فضا و همچنین اتوموبیل‌های نسل جدید پیدا کرده‌اند [9-13].

بسیاری از محققان به منظور افزایش خواص مکانیکی، سایشی و گرمایی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی از عوامل تقویت‌کننده متفاوتی مثل سیلیسیوم کارباید(SiC)، اکسید آلومینیوم (AL2O3)، کارباید برون (B4C) و کارباید تیتانیوم (TiC) استفاده کرده‌اند [3,5,12,13]. در این تحقیق از تنگستن دی سولفید به عنوان فاز تقویت کننده مورد استفاده قرار گرفته است. نانو ذرات تنگستن دی سولفید به علت خواص روان کننده بی‌نظیری که دارند، در محیط‌های سخت و تحت فشارهای بالا، وزن بی‌نهایت و یا خلأ کاربردهای ارزشمندی را پیدا می‌کنند [15]. نانوذرات تنگستن دی سولفید در تماس‌های سطحی با فلزات حتی در دما و فشار بالا عملکرد بسیار خوبی از لحاظ خواص تریبولوژی از خود نشان می‌دهند [16].

در سال‌های اخیر از روش‌های متعددی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی نظیر متالوژی پودر، آلیاژسازی مکانیکی، ریخته‌گری و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) به کار گرفته شده است. روش متالوژی پودر به علت دقت بالا برای تولید نمونه‌های یکسان و با ابعاد هندسی پیچیده بسیار مورد توجه می‌باشد [9]. تولید نانوکامپوزیت با استفاده از روش مرسوم متالوژی پودر دارای نقاط ضعفی از جمله خطوط اتصال نه چندان مستحکم بین فاز تقویت کننده و فاز زمینه و همچنین توزیع غیر یکنواخت نانوذرات در زمینه فلزی می‌باشد [17]. روش پرس گرم که یکی از روش‌های پیشرفته در علم متالوژی پودر محسوب می‌شود به خوبی بر این معایب غلبه می‌کند و توزیع یکنواخت نانوذرات در فاز زمینه را امکان‌پذیر می‌سازد [18]. در این روش ابتدا پودرها داخل قالب فلزی سخت‌کاری شده ریخته می‌شود و در دستگاه پرس گرم قرار داده می‌شود. در ادامه پودرها داخل قالب به صورت تدریجی تا رسیدن به دمای تف‌جوشی تعیین شده، تحت فشار معین پرس می‌گیرند [19,20]. از این رو در این پژوهش، روش پرس گرم به منظور تولید نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است که نبود اطلاعات دمای تفت‌جوشی به منظور تولید نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn تقویت شده با نانوپودرهای تنگستن دی سولفید مناسب از طریق پرس گرم، از مشکلات ساخت این نانوکامپوزیت است که نیازمند ساخت و بررسی در دماهای تفت‌جوشی متفاوت بوده است.

اگر چه محققان زیادی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی متفاوتی را تولید کرده‌اند و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند، تولید نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn-WS2 برای نخستین بار است که در این پژوهش انجام شده است. در این تحقیق هدف تولید نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn تقویت شده با نانوصفحات دی سولفید تنگستن (۰، ۲ و ۵ درصد وزنی) می‌باشد. آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn به دلیل سختی و خواص سایش خوب به عنوان ماده زمینه انتخاب می‌شود. علاوه بر این، این یک آلیاژ سبک در مقایسه با آلیاژ برنج، مس و فولاد است. نانوکامپوزیت‌های Al-8Si-3Cu-2Zn-WS2 با ترکیبی از متالورژی پودر و پرس گرم تحت دمای ۵۱۰ درجه سانتی گراد تولید شدند. Al-8Si-3Cu-2Zn با و بدون نانوصفحات دی سولفید تنگستن تحت آزمایش سایش برای ارزیابی مقاومت به سایش قرار خواهند گرفتند.

روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn با ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول (۱) با ابعاد ۴۰ میکرومتر و خلوص ۹۹ درصد به عنوان فاز زمینه و از دی سولفید تنگستن با ابعاد ۹۰ نانومتر و خلوص ۹۹ درصد به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است. در این تحقیق برای ساخت نمونه پودر آلیاژی، پودرهای خالص آلومینیوم، سیلسیم، مس و روی به مدت ۴۰ ساعت در دستگاه آسیاکاری مکانیکی مخلوط شدند که در نهایت پودر آلیاژی به دست آمد. در شکل (۱) تصویر مواد

استفاده شده در این تحقیق با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است.

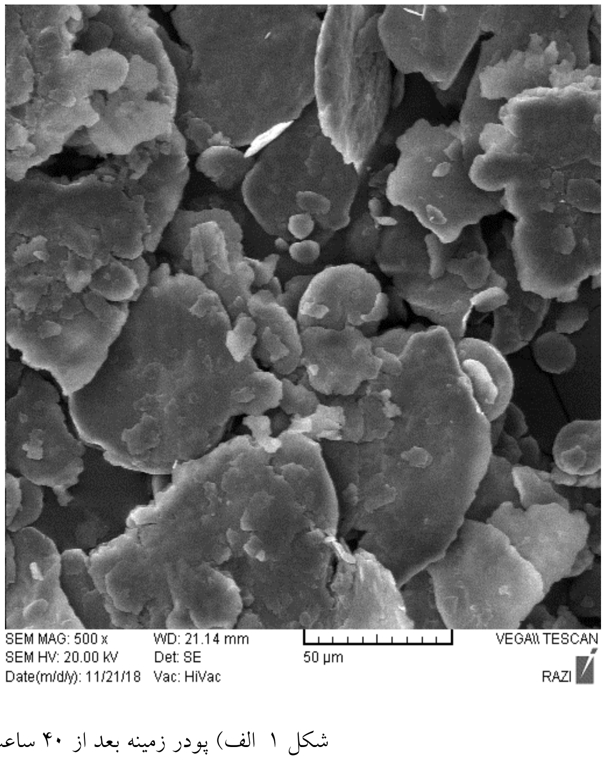
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn به عنوان پودر زمینه

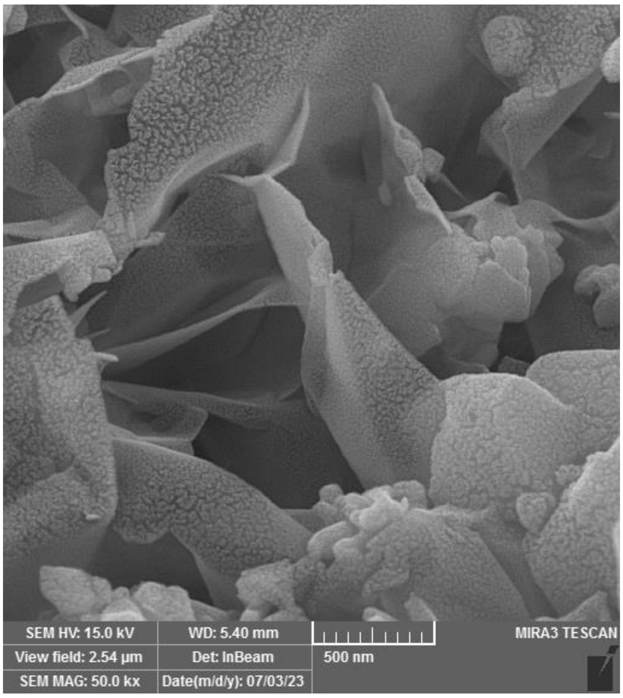
Substance	Al	Si	Cu	Zn	Cu
Wt.%	Bal	8	3	2	0.05

در این تحقیق فرایند تولید نانوکامپوزیت بـه ایـن صـورت می‌باشد که ابتدا پودر آلیاژی آلومینیوم به همراه درصـدهای ۲ و ۵ از دی سولفید تنگستن در دستگاه آسیاب سیاره‌ای دو مخـزن که ظرفیت هر کدام ۳۰ گرم می‌باشد، با استفاده از گلوله‌هایی بـا ابعاد متفاوت با قطرهای ۳–۱۰ میلـی‌متـر بـه مـدت ۱۰ سـاعت آسیاکاری می‌شوند. ۱/۵ درصد اسید استئاریک به عنوان کنتـرل فرایند و جلوگیری از جوش سرد بـه پودرهـا اضـافه مـی‌شـود. نسبت گلوله به پـودر ۱۰:۱ و سـرعت آسـیاکاری ۲۵۰ دور بـر دقیقه در نظر گرفته شده است. سپس پودرهای آسـیاکاری شـده در داخل قالب فولاد سخت شده با جنس فولاد اسـپیکا ریختـه می‌شود و در دستگاه مخصوص پرس گرم به مدت ۳۰ دقیقه تـا رسیدن به دمای ۵۱۰ درجه سانتی گراد در محـیط آرگـون قـرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی ریزسـاختار نمونـه‌هـا از روش اسـتاندارد متالوگرافی ASTM E3-01 استفاده شد. نمونه‌هـا توسـط کاغـذ سنباده شماره ۲۰۰۰ متالوگرافی شدند و برای صاف شدن سطح نمونه پولیش شـدند و سـپس توسـط محلـولی کـه حـاوی ۸۲ میلی‌لیتر H2O، 15.5 میلـی‌لیتـر HNO3، 0.5 میلـی‌لیتـر HF اچ شدند. برای مطالعه ریزساختار نمونه‌ها از میکروسـکوپ نـوری مدل Unione و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) اسـتفاده شد.

علاوه بر این، اندازه‌گیری اندازه دانـه بـا اسـتفاده از آنـالیز تصویر انجام شـد. ریزسـختی ویکـرز نمونـه‌هـا بـا اسـتفاده از تجهیزات Buehler با اعمال بـار ۲۰۰ گـرم بـه مـدت ۱۵ ثانیـه اندازه‌گیری شد. خواص سایشی نمونـه‌هـای اسـتوانه‌ای بعـد از پرس گرم از طریق روش پین روی دیسک بـر طبـق اسـتاندارد ASTM G99 مورد بررسی قرار گرفت. در این تست بارگـذاری ۵ نیوتون و مسافت ۱۰۰۰ متر معـین شـد. بـه منظـور محاسـبه کاهش وزن نمونه‌ها، وزن پین و دیسـک قبـل و بعـد از انجـام آزمـایش بـه طـور دقیـق توسـط تـرازوی الکترونـی حسـاس اندازه‌گیری شد. ضریب اصطکاک به طور مرتـب بـا توجـه بـه بارگذاری در طول مسافت طـی شـده محاسـبه شـده اسـت. در پایان پس از تست، سطوح ساییده شـده توسـط میکروسـکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.





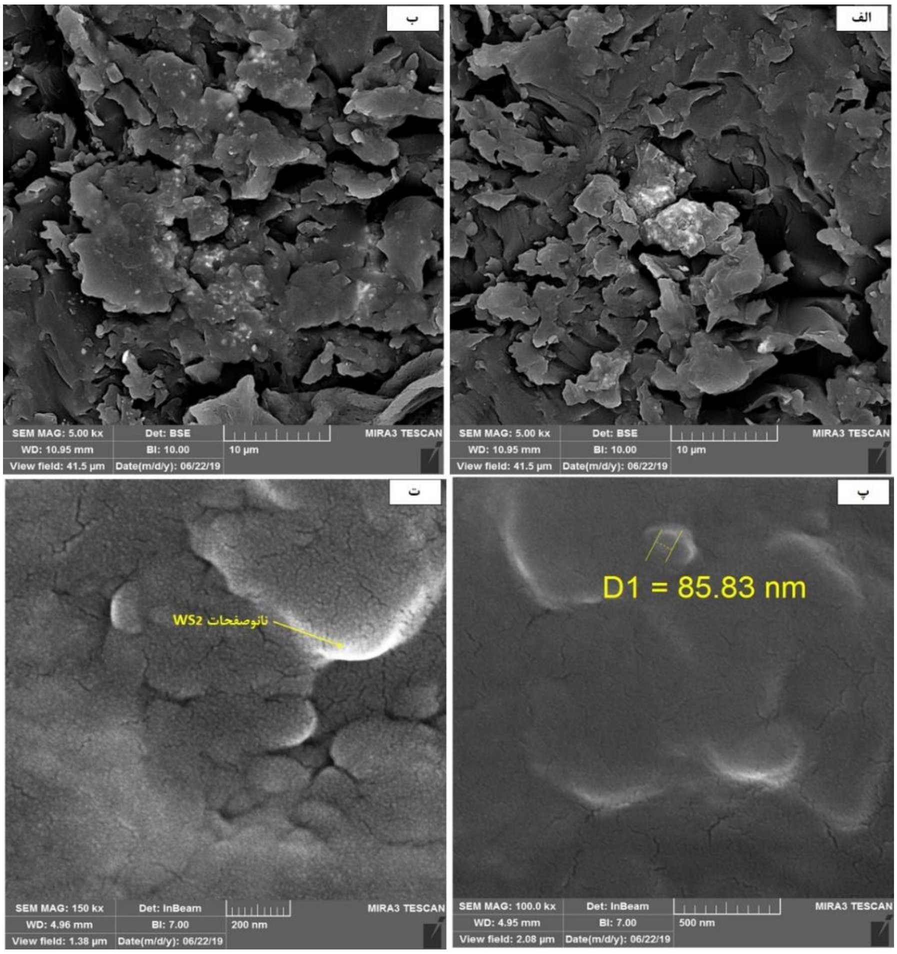
شکل ۱ الف) پودر زمینه بعد از ۴۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، ب) نانوصفحات WS2

نتایج و بحث

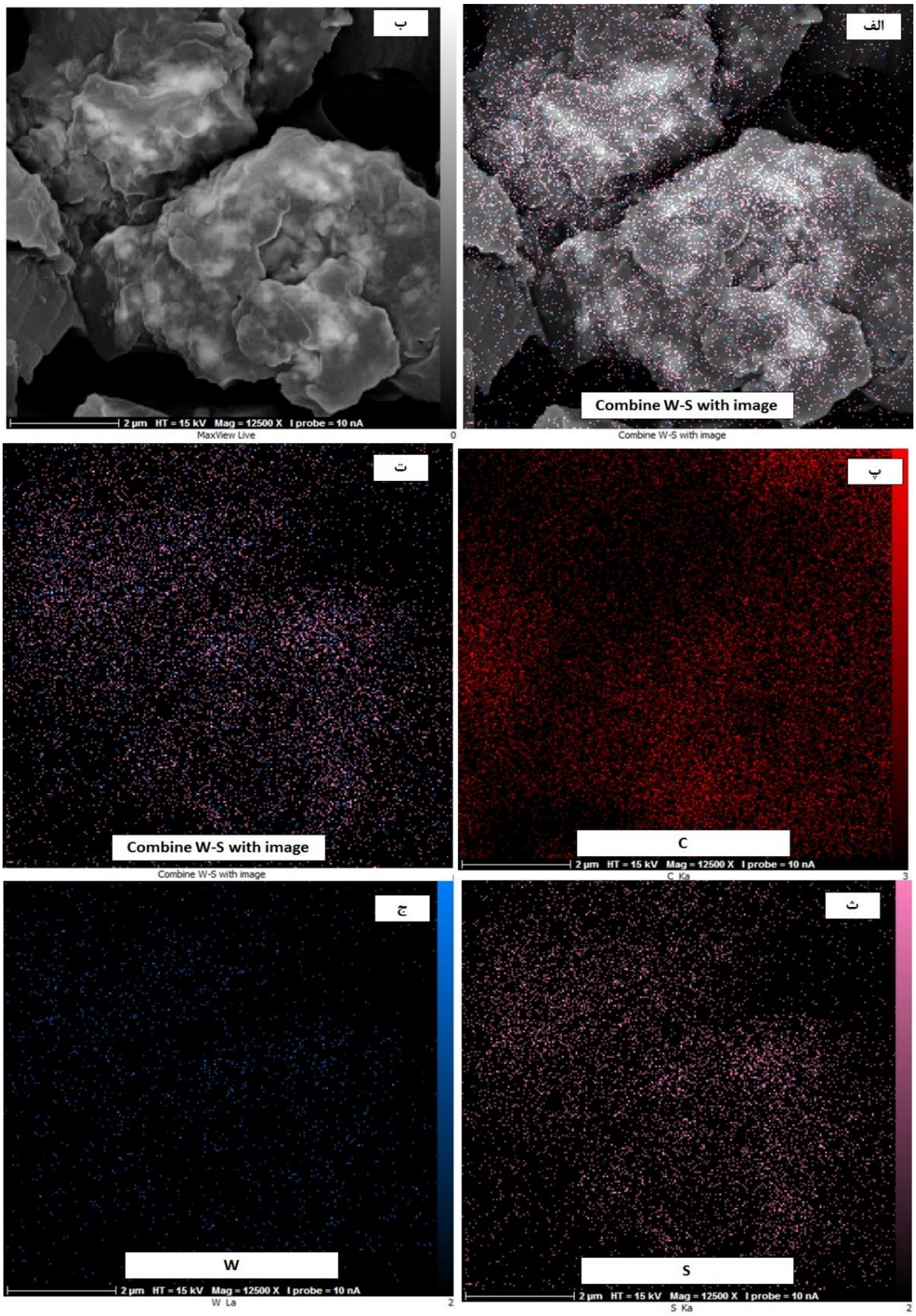
مطالعات ریزساختاری

اندازه اولیه ذرات پودر آلیاژی آلومینیوم قبل از عملیات آسیاکاری، کروی شکل و به اندازه ۵۰ میکرومتر دیده شد. بعد از ۱۰ ساعت عملیات آسیاکاری اندازه ذرات پودر آلیاژی به ۴۰ میکرومتر کاهش پیدا کرد. بدیهی است کاهش اندازه ذرات منجر به تراکم کمتر و انحلال مناسب‌تر در فرایند پرس گرم می‌شود. در شکل (۲) عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) از مورفولوژی پودرهای نانوکامپوزیتی بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۲) مشخص است، بعد از آسیاکاری، مورفولوژی پودرهای آلیاژی به علت تغییر شکل پلاستیک شدید به شکل لایه لایه و فلسی تبدیل می‌شود. در شکل (۳) به وضوح مشخص است که نانوذرات دی سولفید تنگستن در بین ذرات پودر آلیاژی مسطح قرار گرفته و به طور یکنواخت در بین آن‌ها توزیع شده‌اند. فرایند آسیاکاری مکانیکی و تولید نمونه‌های نانوکامپوزیتی با پرس گرم می‌تواند بر توزیع یکنواخت نانوذرات تقویت کننده در زمینه تأثیر به‌سزایی داشته باشد [21,22].

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، آسیاب کاری باعث پخش یکنواخت نانوصفحات دی سولفید تنگستن بر روی پودرهای آلیاژی آلومینیوم شده است. در این روش نانوصفحات بر روی پودرهای آلومینیوم به صورت مکانیکی اتصال پیدا می‌کنند و باعث می‌شوند در حین پرس گرم و تف‌جوشی آگلومره شدن نانوصفحات ایجاد نشود. در نهایت پخش شدن نانوصفحات به صورت یکنواخت باعث بهبود خواص سایشی نانوکامپوزیت خواهد شد. چون نانوصفحات وقتی آگلومره می‌شوند علاوه بر کاهش قدرت تقویت‌کنندگی خود در داخل زمینه، به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و خواص سایشی را کاهش می‌دهند و نانوکامپوزیت دقیقا از محل تمرکز تنش کندگی اتفاق می‌افتد و کاهش وزن افزایش پیدا می‌کند.



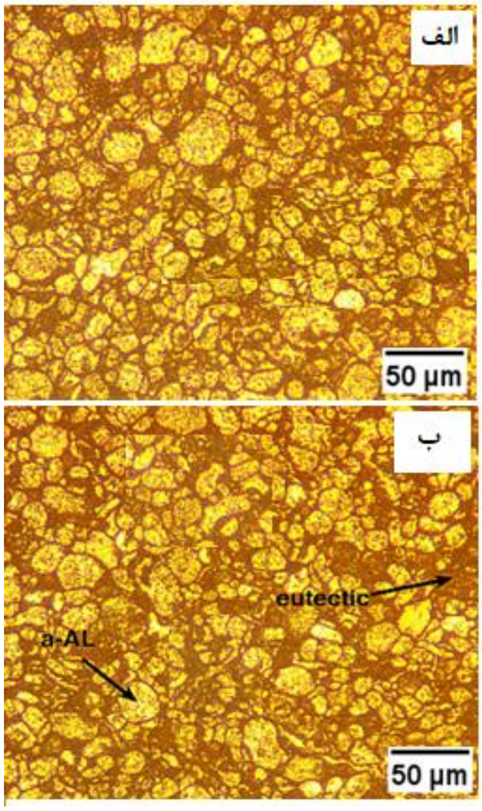
شکل ۲ الف) پودر آلومینیوم حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، ب) پودر آلومینیوم حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2، پ و ت) نانوصفحات WS2 داخل پودرهای آلومینیوم



شکل ۳ پودر آلومینیوم بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری و نحوه پخش نانوصفحات بر روی پودر آلومینیوم

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های آماده‌سازی شده متالوگرافی را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به افزایش مقدار نانوذرات دی سولفید تنگستن، اندازه دانه‌های مناسب‌تری در شکل مشاهده می‌شود. کاهش اندازه دانه به بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت منجر می‌شود [27].

روش‌های متعددی برای فرایند اصلاح دانه‌ها وجود دارد که مهم‌ترین آن استفاده از ذرات ثانویه و اضافه کردن به زمینه است. افزودن نانوذرات WS2 به زمینه آلیاژ به طور قابل توجهی دانه‌های درشت α-Al را به دانه‌های هم‌محوری α-Al بهبود بخشیده است.



شکل ۴ الف) آلیاژ آلومینیوم حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، ب) آلیاژ آلومینیوم حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2 بعد از عملیات پرس گرم

میکروسختی

جدول (۲) مقدار میانگین میکروسختی نمونه‌های تولید شده توسط روش پرس گرم را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است بعد از اضافه کردن نانوذرات تا مقدار ۵ درصد وزنی به زمینه، مقدار میکروسختی تقریبا دو برابر شد به طوری که مقدار میکروسختی برای زمینه آلیاژی ۵۰ ویکرز است و برای نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn -5%WS2 به میزان ۱۰۱ ویکرز افزایش پیدا کرد.

دو عامل بر روی این افزایش مقدار سختی در نانوکامپوزیت‌ها تأثیر بسیار مهمی دارند. عامل اول، تأثیر سخت‌کاری در عملیات آسیاکاری است که به مدت ۱۰ ساعت انجام شده است [20] و منجر به توزیع یکنواخت نانوپودرها و افزایش دانسیته نابه‌جایی‌ها در زمینه کامپوزیت شده است و عامل دوم، سختی ذاتی و خواص متفاوت فاز تقویت کننده است که می‌تواند منجر به چگالی بالاتر و همین طور بسیار مطلوب‌تر شدن اندازه دانه‌ها شود که با کاهش اندازه دانه استحکام و سختی افزایش می‌یابد [23].

جدول ۲ نتایج سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت در شرایط مختلف

نمونه جوش‌کاری شده	میکروسختی نمونه‌ها ویکرز
نمونه پایه	۵۰
۲ درصد WS2	۷۲
۵ درصد WS2	۱۰۱

رفتار سایشی

جدول (۳) نرخ سایش به دست آمده از آزمایش سایش پین روی دیسک را نشان می‌دهد. نرخ سایش با توجه به چگالی نمونه، مسافت طی شده و مقدار کاهش وزن پین در حین انجام تست سایش محاسبه شد. با توجه به نمودار، نرخ سایش از ۷۴ mm^3/Km برای زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn به ۵۱ mm^3/Km برای نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn - 2%WS2 کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است. این کاهش در نرخ سایش می‌تواند به علت حضور فاز تقویت کننده و ایجاد لایه مخلوط مکانیکی (لایه شامل اکسیدهای مختلف) که نقش روانکار را ایفا می‌کند باشد. علاوه بر این طبق معادله ارچارد با افزایش سختی نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند [25].

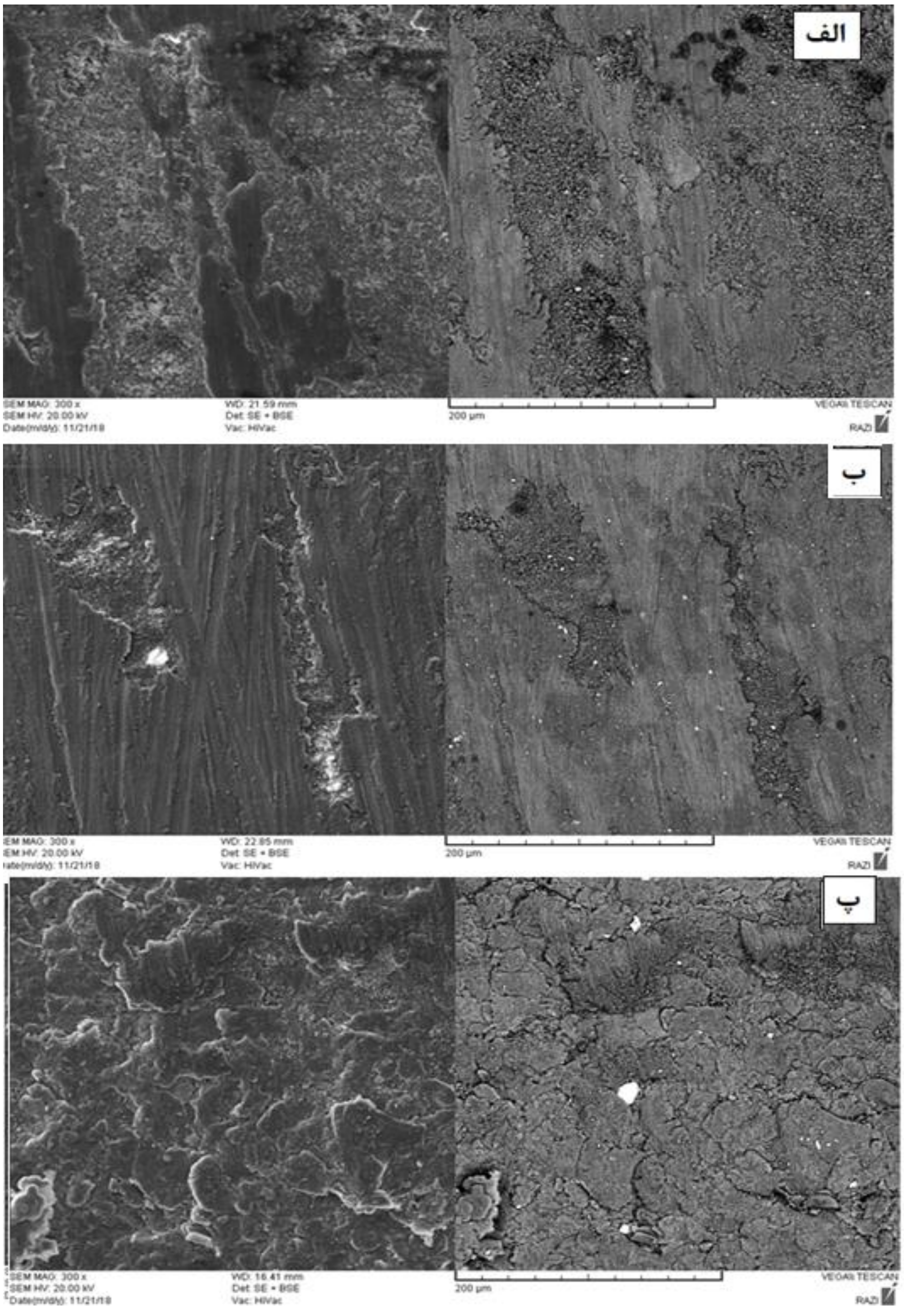
جدول ۳ نتایج نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت در شرایط مختلف

نمونه جوش‌کاری شده	نرخ سایش نمونه‌ها mm^3/Km
نمونه پایه	۷۴
۲ درصد WS2	۵۱
۵ درصد WS2	۵۹

در شکل (۵) تصاویر سطوح سایش نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت را که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده است نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، شیارهای کوچک به وجود آمده در آلیاژ پایه Al-8Si-3Cu-2Zn در مکانیزم سایش بیانگر تغییر شکل پلاستیک و لایه لایه شدگی در سطح سایش می‌باشد. تحت بارگذاری ۵ نیوتون، با توجه به دو ناحیه انتخاب شده در سطوح سایش، حفره‌ها و نواحی صاف در شکل مشخص شده‌اند. لایه‌های جدا شده در شکل دهانه‌ها یا حفره‌ها بیانگر سایش چسبناک به علت تشکیل و شکسته شدن میکروجوش‌ها در طی انجام آزمایش است. به نظر می‌رسد در ابتدای مسافت مورد نظر برای آزمایش سایش، سایش لایه‌ای یک مکانیزم غالب برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی

به شمار می‌رود. می‌توان گفت زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn بدون نانوذرات تقویت کننده با مورفولوژی دندریتی درشت، می‌تواند به راحتی شکسته شود و در نهایت به کاهش وزن زیاد منجر شود.

ضرایب اصطکاک (COF) تحت شرایط بارگذاری برای نانوکامپوزیت‌های مختلف با درصدهای وزنی مختلف نانوصفحات دی سولفید تنگستن در جدول (۴) نشان داده شده است. مشاهده شده است که در یک بار اعمال شده معین، ضرایب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌های تقویت نشده بیشترین مقدار است. ضرایب اصطکاک با افزایش درصد وزنی دی سولفید تنگستن کاهش می‌یابد. این به دلیل وجود نانوصفحات تقویت کننده در نانوکامپوزیت است. بیشترین مقدار آسیب نمونه برای حالتی می‌باشد که هیچ تقویت کننده‌ای استفاده نشده است. از این رو، مقدار محصولات سایش باقی مانده باید دلیل اصلی بزرگ بودن COF باشد. تقویت کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن به دلیل خاصیت خود روانکاری COF را کاهش داده است.



شکل ۵ عکس های SEM از سطوح سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت: الف) پایه، ب) حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، پ) حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2

جدول ۴ ضریب اصطکاک برای آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت‌ها برای درصدهای وزنی مختلف گرافن

Sample	Coefficient of friction
Al-8Si-3Cu-2Zn	0.712
Al-8Si-3Cu-2Zn -2% wt. WS2	0.532
Al-8Si-3Cu-2Zn -5% wt. WS2	0.612

در حین سایش، نانوصفحات دی سولفید تنگستن از نانوکامپوزیت جدا می‌شود و یک لایه روان‌کننده روی سطح بین دو ماده ایجاد می‌کند که ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد. هر چه نانوصفحات دی سولفید تنگستن به طور یکنواخت در داخل زمینه پخش شوند، سختی نانوکامپوزیت را بیشتر بهبود می‌بخشد و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد و مقدار سایش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، برای نانوکامپوزیت‌ها، به دلیل خواص مکانیکی بالاتر آن‌ها، حفظ پایداری لایه اکسید سطحی آسان‌تر است و بنابراین منجر به نوسان نسبتا کمتری می‌شود [23]. در این تحقیق، کاهش اندازه ذرات زمینه از طریق آسیاب گلوله‌ای منجر به توزیع همگن تقویت کننده‌ها در زمینه می‌شود و در نتیجه مقاومت به سایش نانوکامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد.

علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های تولید شده توسط فرایند آسیاب گلوله‌ای و به دنبال آن پرس گرم با ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن، حداکثر مقاومت در برابر سایش را ایجاد می‌کنند. در حالی که ضریب اصطکاک در مورد ۵ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن نسبتا بالا است. این ممکن است به دلیل تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن باشد. نانوصفحات دی سولفید تنگستنی که در داخل زمینه تجمع می‌یابند به عنوان مراکز تنش در هنگام سایش عمل می‌کنند و باعث می‌شوند که قطعه از آن نقطه شکسته شود. این امر باعث کاهش مقاومت به سایش و افزایش نرخ سایش در نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نانوکامپوزیت زمینه فلزی با زمینه Al-8Si-3Cu-2Zn با فاز تقویت کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن با درصد های وزنی مختلف (۲،۰و ۵ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات در مورفولوژی و ریزساختار پودرها بعد از آسیاکاری بحث شد و توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه به خوبی انجام گرفت که منجر به کاهش اندازه ذرات و متعاقبا افزایش تراکم و عملکرد بهتر در فرایند پرس گرم شد. یافته‌های تجربی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. مقدار بهینه نانوذرات ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن است.

۲. هنگامی که درصد وزنی نانوکامپوزیت به بیش از ۲ درصد وزنی برسد. تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن در مرز دانه باعث تردی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

۳. با این حال، افزایش بیش از حد مقدار نانوصفحات دی سولفید تنگستن باعث تجمع و آگلومره شدن می‌شود، بنابراین COF و نرخ سایش افزایش می‌یابد.

۴. مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت‌های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه بیشتر می‌باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خود روان کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن به ترتیب برابر است با ۰,۷۱۲ و ۰,۵۳۲ که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می‌باشد. همچنین سختی نمونه‌ها از ۵۰ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۰۱ ویکرز برای نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن افزایش می‌یابد.

۵. انتقال مکانیزم سایش از ترکیب سایش لایه لایه، سایش چسبان و سایش ساینده به سایش خفیف ساینده با افزایش محتوای تقویت کننده نانوصفحات گرافن تا ۲ درصد وزنی وجود داشت.

۶. افزایش محتوای نانوصفحات دی سولفید تنگستن برای تشکیل MML در طول فرایند لغزش خشک مفید بود که نه تنها می‌تواند از سطح ساییده محافظت کند بلکه COF نانوکامپوزیت‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A.B. Elshalakany, T.A. Osman, A. Khattab, B. Azzam, M. Zaki, "Microstructure and mechanical properties of MWCNTs reinforced A356 aluminum alloys cast nanocomposites fabricated by using a combination of rheocasting and squeeze casting techniques," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2014, pp. 1-10, 2014.

[2] X.D. Liu, S.A. Jia, L. Nastac, "Ultrasonic cavitation-assisted molten metal processing of cast A356-nanocomposites," *International Journal of Metalcasting*, vol. 8, no. 3, pp. 51–58, 2014.

[3] Omyma El-Kady, A. Fathy, "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites," *Materials and Design*, vol. 54, pp. 348-353, 2014.

[4] Yang Xuan, Laurentiu Nastac, "The role of ultrasonic cavitation in refining the microstructure of aluminum based nanocomposites during the solidification process," *Ultrasonics*, vol. 83, pp. 94–102, 2018.

[5] S. Ahmadifard, A. Heidarpour, S. Kazemi, "The effects of Pass number and Nano-Size ZrO2 powder on the Mechanical, Microstructure and Wear behavior in Friction Stir Welding of the Al-5083," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 219-227, 2018.

[6] P.K. Dinesh Kumar, S. Darius Gnanaraj, "Studies on Al-Si based hybrid aluminium metal matrix nanocomposites," *Materials Today Communications*, vol. 38, p. 108132, 2024.

[7] S. Kiani, S. Ehsan Mirsalehi, "Friction stir additive manufacturing of B4C and graphene reinforced aluminum matrix hybrid nanocomposites using consumable pins," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 1094-1110, 2024.

[8] S.S. Mirian Mehrian, F. Khodabakhshi, M. Rahsepar, M. Mohammadi, A.P. Gerlich, "Electrochemical corrosion characteristics of friction stir-reacted aluminum matrix hybrid nanocomposites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 1924-1940, 2024.

[9] P. Raj, P.L. Biju, B. Deepanraj, N. Menachery, "A systematic review on characterization of hybrid aluminium nanocomposites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, no. 4, pp. 2139-2150, 2023.

[10] J.J.S. Dilip, M. Koilraj, V. Sundareswaren, G.D. Janaki Ram, S.R. Koteswara Rao, "Microstructural characterization of dissimilar friction stir welds between AA2219 and AA5083," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 63, no. 3, pp. 757–764, 2010.

[11] R. Abedinzadeh, E. Norouzi, D. Toghraie, "Study on machining characteristics of SiC–Al2O3 reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning," *Ceramics International*, vol. 48, pp. 29205-29216, 2022.

[12] S. Ozkaya, A. Canakci, "Effect of the B4C content and the milling time on the synthesis, consolidation and mechanical properties of AlCuMg-B4C nanocomposites synthesized by mechanical milling," *Powder Technology*, vol. 297, pp. 8-16, 2016.

[13] G.S.P. Kumar, P.G. Koppad, R. Keshavamurth, M. Alipour, "Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061–TiC metal matrix composites," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 17, pp. 535-544, 2017.

[14] A. Fathy, A. Abu-Oqail, A. Wagih, "Improved mechanical and wear properties of hybrid Al-Al2O3/GNPs electro-less coated Ni nanocomposite," *Ceramics International*, vol. 44, pp. 22135-22145, 2018.

[15] Z. Lu, Z. Cao, E. Hu, K. Hu, X. Hu, "Preparation and tribological properties of WS2 and WS2/TiO2 nanoparticles," *Tribology International*, vol. 130, pp. 308-316, 2019.

[16] R. M, N. VB, Walker J, Zekonyte J, "Mechanism of action of WS2 lubricant nanoadditives in high-pressure contacts," *Tribology Letters*, vol. 52, pp. 81−91, 2013.

[17] Yu-Yang Gao, Feng Qiu, Shu-Li Shu, "Mechanical properties and abrasive wear behaviors of in situ nano-TiCx/Al–Zn–Mg–Cu composites fabricated by combustion synthesis and hot press consolidation," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 179-187, 2019.

[18] M. Jafari, M.H. Abbasi, M.H. Enayati, F. Karimzadeh, "Mechanical properties of nanostructured Al2024–MWCNT composite prepared by optimized mechanical milling and hot pressing methods," *Advanced Powder Technology*, vol. 23, pp. 205–210, 2012.

[19] A. Alizadeh, M. Maleki, A. Abdollahi, "Preparation of super-high strength nanostructured B4C reinforced Al-2Cu aluminum alloy matrix composites by mechanical milling and hot press method: Microstructural, mechanical and tribological characterization," *Advanced Powder Technology*, vol. 28, pp. 3274-3287, 2017.

[20] A. Zolriasatein, R. Khosroshahi, M. Emamy, N. Nemati, "Mechanical and wear properties of Al-Al3Mg2 nanocomposites prepared by mechanical milling and hot pressing," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, pp. 290-297, 2013.

[21] P.G. Koppad, H.R.A. Ram, C.S. Ramesh, K.T. Kashyap, R.G. Koppad, "On thermal and electrical properties of multiwalled carbon nanotubes/copper matrix nanocomposites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 580, pp. 527-532, 2013.

[22] S.E. Shin, H.J. Choi, J.H. Shin, D.H. Bae, "Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites," *Carbon*, vol. 82, pp. 143-151, 2015.

[23] F. Mokdad, D. Chen, Z. Liu, B. Xiao, D. Ni, Z. Ma, "Deformation and strengthening mechanisms of a carbon nanotube reinforced aluminum composite," *Carbon*, vol. 104, pp. 64-77, 2016.

[24] N. Hosseini, F. Karimzadeh, M.H. Abbasi, M.H. Enayati, "A comparative study on the wear properties of coarse-grained Al6061 alloy and nanostructured Al6061–Al2O3 composites," *Tribology International*, vol. 54, pp. 58–67, 2012.

[25] I. Manivannan, S. Ranganathan, S. Gopalakannan, "Tribological and surface behavior of Silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposite," *Surfaces and Interfaces*, vol. 8, pp. 127-136, 2017.

[26] E. Mohammad Sharifi, F. Karimzadeh, M.H. Enayati, "Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 3263–3271, 2011.